# МЕХАНИКА
# MECHANICS



УДК 534.143 10.23947/1992-5980-2017-17-4-5-13

## Влияние геометрических и физических параметров на резонансные частоты ультразвуковых колебаний системы упругих и пьезоэлектрических элементов*

**А. С. Скалиух[1], Т. Е. Герасименко[2], П. А. Оганесян[3], А. А. Соловьева[4**]**
[1,2,3,4] Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

## Effect of geometric and physical parameters on resonant frequencies of ultrasonic vibrations of elastic and piezoelectric element system***

**A. S. Skaliukh[1], T. E. Gerasimenko[2], P. A. Oganesyan[3], A. A. Solovieva[4**]**
[1,2,3,4] Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

*Введение.* Исследованы резонансные частоты продольных колебаний системы, состоящей из цепочки разных по геометрическим и физическим параметрам элементов: пьезокерамического, упругого и акустического. Проведено сравнение результатов в пакетах COMSOL и ACELAN. Оценена зависимость значения первой собственной частоты от геометрических параметров. Исследовано влияние динамической вязкости на АЧХ продольных колебаний.

*Материалы и методы.* Для исследования выбрана система упругих и акустических элементов, позволяющая описывать работу ультразвукового режущего устройства. Возбудителем колебаний выступает пьезокерамический преобразователь, совершающий колебания по толщине. Концентратор колебаний и стержневой элемент принимаются в качестве упругих элементов и выполнены из нержавеющей стали. Имитатором режущего элемента выступает акустическая жидкость. Проведен модальный и гармонический анализ сложной системы, состоящей из разных по физическим свойствам элементов.

*Результаты исследования.* Построены осесимметричная и трехмерная конечноэлементные модели исследуемой системы. Для концентратора колебаний предложены различные виды кривизны и толщины звена с изменяемой формой поверхности. Получены первые собственные частоты продольных колебаний стержневого элемента, контактирующего с акустической жидкостью. Установлено хорошее согласие с результатами работы конечноэлементного пакета ACELAN. Получены амплитудно-частотные характеристики колебаний концевой части вблизи первой резонансной частоты. Отмечено, что вязкость акустической среды мало влияет на амплитуду колебаний упругого стержня и совсем не влияет на резонансную частоту.

*Обсуждение и заключения.* Гармонический и модальный анализ показал, что высокочастотные продольные колебания стержневого элемента значительно зависят от тангенса угла потерь упругих элементов и слабо зависят от вязкости контактирующей акустической среды. Полученные результаты могут представлять интерес при конструировании ультразвуковых режущих медицинских приборов.

*Introduction.* Resonance frequencies of the longitudinal oscillations are investigated for a system consisting of diverse geometrical and physical elements – piezoceramic, elastic, and acoustic ones. The results are compared in COMSOL and ACELAN packages. The dependence of the first eigenfrequency value on the geometric parameters is evaluated. The dynamic viscosity effect on the longitudinal oscillations FRF is studied.

*Materials and Methods.* The system of elastic and acoustic elements which allows describing the operation of an ultrasonic cutting device is selected for the study. The oscillator is a piezoelectric transducer which oscillates in thickness. An oscillation concentrator and a rod element are specified as elastic elements. They are made from stainless steel. The cutting element simulator is acoustic fluid. Modal and harmonic analysis of a complex system consisting of diverse physical elements is carried out.

*Research Results.* Axisymmetric and three-dimensional finite-element models of the investigated system are constructed. Various types of curvature and thickness of the link with changeable surface shape are proposed for the oscillation concentrator. The first eigenfrequencies of the longitudinal vibrations of the rod element contacting with the acoustic liquid are obtained. Good agreement with the results of the ACELAN finite-element package is established. The amplitude-frequency characteristics of the end oscillations near the first resonance frequency are obtained. It is notable that the acoustic medium viscosity has little effect on the oscillation amplitude of the elastic rod, and does not affect the resonance frequency at all.

*Discussion and Conclusions.* Harmonic and modal analysis has shown that the high-frequency longitudinal vibrations of the rod element depend significantly on the dissipation factor of the elastic elements, and depend weakly on the viscosity of the contacting acoustic medium. The results obtained may be of interest under designing ultrasonic cutting medical devices.



*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 17–08–00860–а).
**E-mail: a.s.skaliukh@gmail.com, tegerasimenko@sfedu.ru, paul.oganesyan@yandex.ru, solovievarc@gmail.com
*** The research is done with the financial support from RFFI (Grant no. 17–08–00860–a).

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, пьезоэлектрический преобразователь, ультразвуковой скальпель, амплитудно-частная характеристика.

***Образец для цитирования:*** Обеспечение надежности технологических процессов вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей в среде стальных шаров / А. С. Скалиух, [и др.] Соловьева // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 4. — С. 5–13.

**Keywords**: finite-element method, piezoelectric transformer, harmonic scalpel, frequency-response analysis.

***For citation***: A.S. Skaliukh, T.E. Gerasimenko, P.A. Oganesyan, A.A. Solovieva. Effect of geometric and physical parameters on resonant frequencies of ultrasonic vibrations of elastic and piezoelectric element system. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 5–13.

**Введение.** Ультразвуковые скальпели позволяют проводить рассечение и коагуляцию тканей с целью остановки кровотечения [1–4]. Конструктивно такие приборы состоят из цепочки упругих и пьезокерамических (или магнитострикционных) элементов, собранных в единую систему, создающую максимальные продольные колебания режущему элементу на частотах от 20 до 50 КГц. Наиболее эффективным будет режим, при котором режущий элемент совершает продольные колебания на резонансной частоте. Под воздействием кавитации клеточной структуры прилегающих к лезвию слоев ткани сухое трение переходит в полусухое или даже жидкостное. Это приводит к существенному уменьшению как нормального, так и тангенциального усилия резания, но максимальная амплитуда колебаний и частота резонанса изменяются. Поэтому указанная в инструкциях к ультразвуковым скальпелям основная частота колебаний без учета нагрузки на режущий элемент вряд ли будет резонансной. С другой стороны, в цепочке упругих элементов содержится концентратор колебаний, позволяющий увеличить амплитуду продольных колебаний рассекающего элемента, форма и размеры которого влияют на амплитудно-частотные характеристики скальпеля. Еще одним важным элементом является пьезокерамический преобразователь, который может быть многосекционным, а может иметь и неоднородную предварительную поляризацию [5–7].

Для моделирования работы ультразвукового режущего прибора была рассмотрена конечноэлементная модель составной системы пьезокерамических и упругих элементов, один из которых имеет превалирующий над остальными продольный размер, с целью изучения влияния параметров физического и геометрического характера на его продольные колебания. Такая система близка к конструкции медицинского ультразвукового скальпеля и может быть использована при моделировании его работы.

Среди факторов, которые влияют на собственные частоты исследуемых колебаний, можно выделить три основные группы: геометрические параметры, материальные свойства, неоднородная поляризация пьезоэлемента. Кроме этого, при расчете рабочих характеристик учитывалась среда, с которой контактирует рассекающий элемент. С этой целью была использована модель вязкой акустической жидкости. Для анализа поведения скальпеля в различных типах тканей параметрами этой жидкости (например, вязкостью и плотностью) можно варьировать. Различные подходы к моделированию свойств живых тканей, в том числе и акустических жидкостей, представлены в [8, 9].

В данной работе построена параметризованная геометрия модели, проведена серия численных экспериментов и определены изменения собственных частот в зависимости от размеров отдельных элементов системы. Кроме того, были проанализированы амплитудно-частотные характеристики системы на частотах, близких к резонансу в зависимости от физических свойств акустической среды жидкости.

**Материалы и методы.** Для исследования была взята система, состоящая из цепочки упругих и пьезокерамических элементов, показанных на рис. 1.

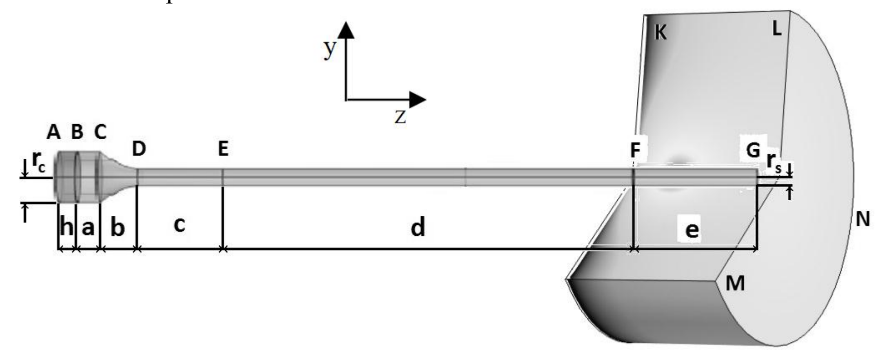



Рис. 1. Параметризованная геометрия модели скальпеля в осесимметричной и в трехмерной постановке в пакете COMSOL

*Fig. 1. Parametrized scalpel model geometry in axisymmetric and three-dimensional setting in COMSOL package*

Здесь участки AB, BD, DG — пьезокерамический элемент, концентратор колебаний и стержневой элемент соответственно. Все элементы имеют осесимметричное строение. Пьезоэлемент представляет собой цилиндрический пьезокерамический преобразователь с толщиной h и предварительной поляризацией, направленной по толщине. Электроды нанесены на лицевые поверхности пьезокерамического цилиндра, и на них подается разность потенциалов, из-

меняющаяся по гармоническому закону во времени. Материал концентратора колебаний и стержневого элемента — нержавеющая сталь. Контактное взаимодействие между преобразователем и концентратором колебаний и между концентратором и стержнем считается безотрывным. Сечение A преобразователя закреплено; на боковой поверхности имеет место гладкий жесткий контакт.

Последнее условие выполнено и для концентратора напряжений на участке BC длиной a. Остальная боковая поверхность длиной b свободна от механических напряжений. Для стержня принималось условие гладкого жесткого контакта на участке DE длиной c. На участке EF длиной d принимались нулевые напряжения. На участке FG длиной e и на его концевом сечении G имеет место сопряжение с акустической средой KLNM. При этом считалось, что на лицевой поверхности, проходящей через точку K, звуковое давление равно нулю, на боковой поверхности KL имеет место условие импедансного типа, а лицевая поверхность LNM — непроницаемая плоскость.

Каждая из отмеченных выше сред описывается линейными моделями, которые для упрощения представим в векторном виде.

Пьезокерамическая среда:

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}=\rho\omega^2\mathbf{u};\qquad \boldsymbol{\sigma}=\mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}-\mathbf{e}^{\mathrm{T}}\cdot\mathbf{E};\qquad \boldsymbol{\varepsilon}=1/2(\nabla\mathbf{u}+\nabla\mathbf{u}^{\mathrm{T}});$$
$$\nabla\cdot\mathbf{D}=0;\qquad \mathbf{D}=\mathbf{e}:\boldsymbol{\varepsilon}+\boldsymbol{э}\cdot\mathbf{E};\qquad \mathbf{E}=-\nabla\varphi; \tag{1}$$

в которой $\boldsymbol{\sigma},\boldsymbol{\varepsilon},\mathbf{D},\mathbf{E},\mathbf{u},\varphi,\mathbf{C},\mathbf{e},\boldsymbol{э},\rho,\omega$ — тензор напряжений, тензор деформаций, вектор электрического смещения, вектор электрического поля, вектор перемещения, электрический потенциал, тензор упругих постоянных, тензор пьезоэлектрических констант, тензор диэлектрических проницаемостей, плотность материала керамики и круговая частота соответственно.

Упругая среда:

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}=\rho_k\,\omega^2\mathbf{u};\qquad \boldsymbol{\sigma}=\lambda_k\,\mathrm{tr}\,\boldsymbol{\varepsilon}\,\mathbf{I}+2\mu_k\,\boldsymbol{\varepsilon};\qquad \boldsymbol{\varepsilon}=1/2(\nabla\mathbf{u}+\nabla\mathbf{u}^{\mathrm{T}}); \tag{2}$$

в которой $\boldsymbol{\sigma},\boldsymbol{\varepsilon},\mathbf{u},\mathbf{I},\lambda_k,\mu_k,\rho_k$ — тензор напряжений, тензор деформаций, вектор перемещения, единичный тензор, коэффициенты Ламе и плотность материала концентратора колебаний и стержня соответственно ($k$ = 1,2). Затухание в этих материалах моделируется с помощью комплексных коэффициентов Ламе, и тангенс угла потерь равен 0,0001.

Акустическая среда:

$$\nabla\cdot\left(-\frac{1}{\rho_c}\nabla\mathrm{p}\right)-\frac{k_{eq}^2\,\mathrm{p}}{\rho_c}=0;\quad k_{eq}^2=\left(\frac{\omega}{c_c}\right)^2;\quad c_c=c\left(1+i\omega\frac{\left(\frac{4\mu_a}{3}+\mu_b\right)}{\rho c^2}\right)^{0.5};\quad \rho_c=\frac{\rho c^2}{c_c^2}; \tag{3}$$

в которой $\mathrm{p},\rho,c,\mu_a,\mu_b$ — акустическое давление, плотность жидкости, скорость звука в ней, динамическая вязкость и второй коэффициент вязкости среды соответственно.

Граничные условия и условия сопряжения были подробно описаны выше, они очевидны, поэтому математические формулы для них выписываться не будут. Добавим только, что, если будут рассматриваться неоднородно поляризованные керамические таблетки, то упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические характеристики таких сред будут представлять функции координат области, занятой керамикой.

Для описания геометрии всех элементов системы были разработаны три конечноэлементные модели. Две осесимметричные модели были построены в пакетах ACELAN и COMSOL. Третья модель построена в пакете COMSOL для случая 3D.

В основе каждой модели лежит параметризованная геометрия, представленная на рис. 1, где также указаны независимые параметры, отвечающие за геометрию модели. В левой части системы расположен пьезокерамический цилиндр, выделенный более темным цветом. Следующий элемент — стальной концентратор колебаний, состоящий из двух геометрических компонентов: цилиндра и конусообразного переходника. В реальных конструкциях хирургических инструментов толщины преобразователя и радиусы концевых сечений концентратора связаны с длинами распространяющихся волн. В предлагаемом варианте мы отказались от дополнительных ограничений на геометрические параметры, чтобы иметь возможность получить более общие результаты. При этом в модель заложена возможность изменять функциональным образом диаметр конусообразной части. С этой целью образующая конуса в глобальных координатах в плоскости YZ описывается квадратичным уравнением:

$$y(z)=kz^2+k_1z+k_2;\qquad k_1=\frac{rs-rc+k(z_0^2-z_2^2)}{z_2-z_0};$$
$$k_2=rc-k_1z_0^2;\qquad z_0=hc+a;\qquad z_1=z_0+b,$$

которое позволяет проводить численные эксперименты для вогнутых и выпуклых профилей направляющей, изменяя лишь один параметр *k,* как это показано на рис. 2.



Рис. 2. Различные формы переходника между пьезоэлементом и стержнем (форма определяется параметром *k*)

*Fig. 2. Various forms of the adapter between the piezoelectric cell and the rod (the shape is determined by the parameter k)*

Следующий в цепочке упругих элементов — стержень, имитирующий тело рассекателя. Стержень разделен на три условные части, на каждой из которых задаются свои граничные условия, как говорилось выше. Акустическая часть также представлена на рис. 1 затемненным цветом и располагается справа. Для удобства в этой среде был сделан разрез, позволяющий оценить ее влияние на продольные колебания стержневой конструкции. Полный список независимых геометрических параметров приводится в табл. 1.

Таблица 1

*Table 1*

Изменяемые параметры модели

*Model changing parameters*

| Обозначение | Начальное значение | Описание |
|---|---|---|
| $r_c$ | 7,5 мм | Радиус керамического диска |
| $h$ | 5 мм | Толщина керамического диска |
| $a$ | 5 мм | Толщина слоя металла |
| $b$ | 10 мм | Толщина переходника |
| $r_s$ | 2,5 мм | Радиус стержня |
| $k$ | –80 | Безразмерный параметр кривизны образующей конуса переходника |
| $c$ | 0,02 | Длина начального сегмента стержня |
| $d$ | 0,2 | Длина среднего сегмента стержня |
| $e$ | 0,03 | Длина сегмента стержня, погруженного в жидкость |
| $\mu$ | Pa·s | Вязкость жидкости |
| $\rho$ | 1500 кг/м$^3$ | Плотность жидкости |
| $c_s$ | 1900 м/с | Скорость звука в жидкости |

Физические параметры жидкости, симулирующей поведение среды, с которой происходит контактное взаимодействие, находятся в нижней части этой таблицы. Это скорость распространения звука, плотность и динамическая вязкость (второй коэффициент вязкости принимался равным нулю). Более подробно математические модели электроупругих и упругих тел (1)–(2), нагруженных на акустическую среду (3), используемые в пакете ACELAN, представлены в [10].

**Результаты исследования.** Для осесимметричной и трехмерной моделей была проведена оценка качества конечноэлементных сеток. Задача на собственные значения решалась на сетках с различными размерами. Измельчение сетки продолжалось до тех пор, пока дальнейшее уменьшение размеров не начинало влиять на результат по заданной погрешности. В нашем случае результатом исследования была выбрана первая собственная частота резонанса продольных колебаний $f_1$. Продольные колебания отбирались посредством перебора собственных форм колебаний. В табл. 2 приведены результаты расчетов, по итогам которых определены оптимальные размеры сеток, позволяющие получить достоверные результаты с минимальным числом элементов.

Таблица 2
*Table 2*

Результаты подбора сеток

*Grid selection results*

| | 2D | | 3D | |
|---|---|---|---|---|
| Размер элемента [min; max] (м) | $f_1$ (Гц) | Степеней свободы | $f_1$ (Гц) | Степеней свободы |
| [6,8 $\cdot 10^{-4}$; 0,034] | 4900,8 | 827 | 5050 | 3300 |
| [1,02$\cdot 10^{-4}$; 0,0228] | 4900,3 | 1059 | 5011,4 | 6316 |
| [1,02$\cdot 10^{-4}$; 0,018] | 4900,1 | 1095 | 4934,7 | 22960 |
| [4,25$\cdot 10^{-5}$; 0,0126] | 4900,1 | 1559 | 4932,1 | 178816 |

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что для достижения заданной точности осесимметричная модель позволяет использовать значительно меньшее число степеней свободы. Так, с погрешностью $\delta = 0{,}6\%$ в осесимметричной модели можно взять в 115 раз меньше конечных элементов, что важно при решении задач оптимизации по параметрам. Однако в дальнейшем возникнет необходимость использовать трехмерную модель, когда будет учитываться неосесимметричный вид наконечника стержня и неосесимметричная форма внешних воздействий.

Первый этап численного эксперимента заключался в валидации моделей путем сравнения различных реализаций при решении задачи на собственные значения. Была отработана методика определения первых трех рабочих частот устройства, которые соответствуют продольным колебаниям стержня (в табл. 2 указано значение только первой из них).

Следующий шаг численных экспериментов заключался в сравнении результатов расчета собственных частот продольных колебаний, полученных разными моделями и разными конечноэлементными комплексами.

В частности, в пакете ACELAN была построена осесимметричная модель этой системы. В табл. 3 представлены результаты вычисления первых двух собственных частот.

Таблица 3
*Table 3*

Результаты решения задачи на собственные значения на оптимальных сетках в различных пакетах

*Results of solving eigenvalue problem on optimal grids in various packages*

| Модель | $f_1$ (Гц) | $f_2$ (Гц) |
|---|---|---|
| ACELAN | 4907 | 14711 |
| COMSOL (2D) | 4900,1 | 14691 |
| COMSOL (3D) | 4932,1 | 14782 |

Сравнение результатов показывает, что осесимметричные модели согласуются с очень высокой точностью. Разница между трехмерной моделью и осесимметричной может быть вызвана сложностью построения объемной сетки на наиболее тонких участках геометрии.

Возможности постпроцессора пакета COMSOL позволяют построить трехмерное изображение по итогам решения осесимметричной задачи. Здесь и далее в работе приводятся результаты постпроцессорной обработки решений осесимметричной задачи.

Была проведена оценка влияния геометрических параметров на собственные частоты (СЧ). На рис. 3 представлены зависимости СЧ от различных геометрических параметров.

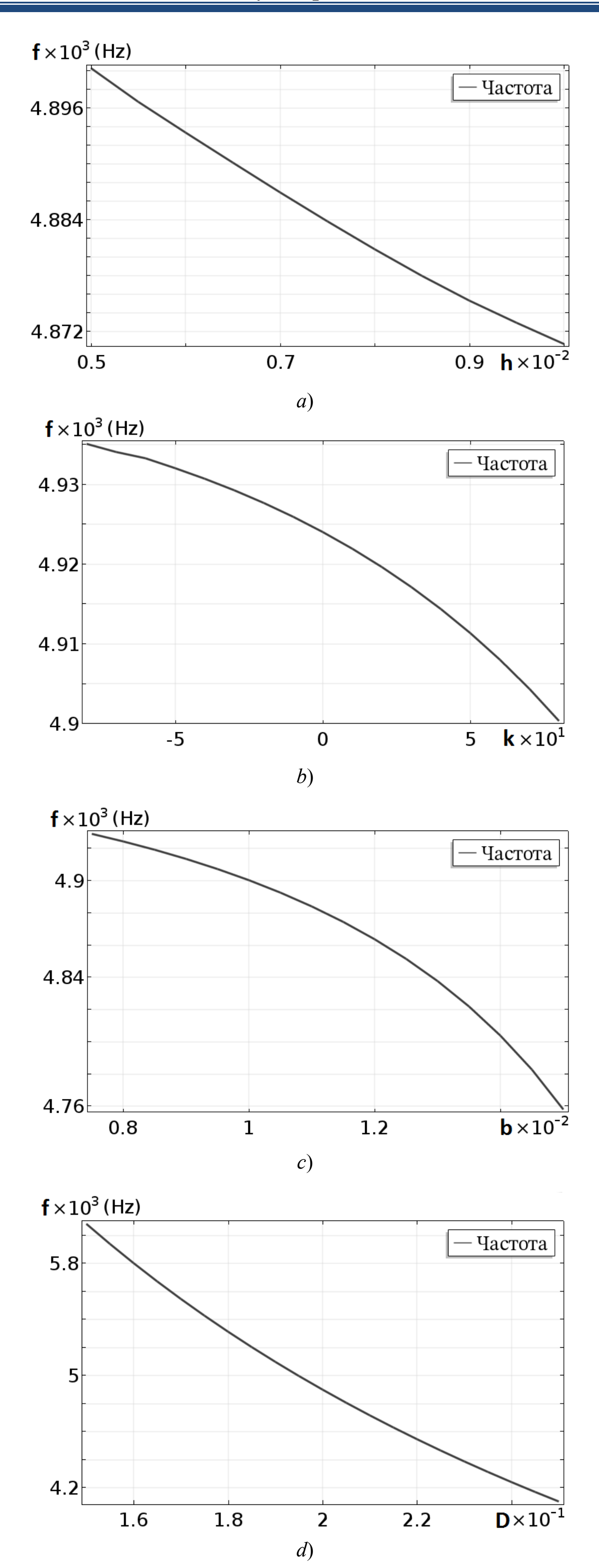



Рис. 3. Влияние на собственную частоту геометрических параметров: толщины h пьезопреобразователя (a); параметра кривизны k направляющей концентратора колебаний (b); толщины b концентратора колебаний (c); длины D стержня (d)

*Fig. 3. Effect on eigenfrequency of geometric parameters: thickness h of piezoelectric transformer (a); curvature parameter k of oscillation concentrator guide (b); thickness b of oscillation concentrator (c); rod length D (d)*

Из рисунков видно, что с увеличением толщины преобразователя, равно как и с увеличением длины стержневой части, первая собственная частота уменьшается. Это уменьшение будет значительным, когда приходится увеличивать длину стержневой части, но практически отсутствует при малом изменении толщины преобразователя. Характерно, что на собственную частоту также практически не влияет кривизна концентратора напряжений и его длина.

Другой важной характеристикой является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) продольных колебаний вблизи резонансных частот. Так, на рис. 4 приведены результаты расчета АЧХ продольных колебаний вблизи резонансной частоты при определенных значениях независимых физических и геометрических параметров.

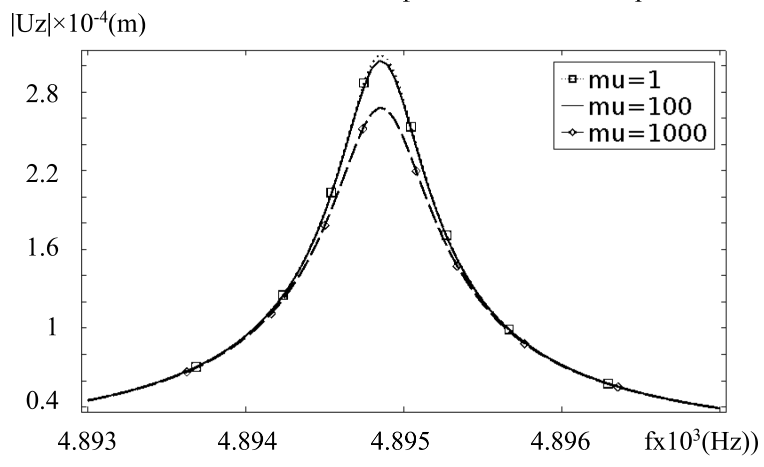



Рис. 4. АЧХ вынужденных колебаний скальпеля при различных значениях вязкости

*Fig. 4. FRF of forced scalpel oscillations at various values of viscosity*

Расчеты проводились с учетом акустической жидкости, в которую вставлен конец стержневой части. Воздействие акустической жидкости приводит к демпфированию, при котором частота резонанса меняется в зависимости от свойств среды. На рис. 4 изображены АЧХ продольных колебаний для различных значений динамической вязкости. Второй коэффициент вязкости принимался равным нулю.

Интересно отметить, что при изменениях вязкости акустической среды в большом диапазоне АЧХ изменяется незначительно. Отсюда можно сделать вывод, что основным фактором, влияющим на амплитуду колебаний в окрестности первого резонанса продольных колебаний, является затухание в упругой среде. Таким образом, увеличение вязкости акустической среды более чем на порядок не приводит к значительному снижению амплитуды колебаний стержневого звена. Интересно также отметить, что вязкость оказывает влияние на амплитуду колебаний, но не на частоту. Это может быть связано с небольшой площадью сечения скальпеля.

**Обсуждение и заключения.** В настоящей работе были исследованы резонансные частоты продольных колебаний системы, состоящей из цепочки разных по физическим параметрам элементов: пьезокерамического, двух упругих и акустического. С этой целью были построены осесимметричные и трехмерные конечноэлементные модели. Для сравнения были выбраны два конечноэлементных пакета COMSOL и ACELAN. Обнаружено хорошее совпадение результатов по собственным частотам для осесимметричной задачи. Построенная трехмерная модель послужит в дальнейшем при моделировании несимметричных задач. Проведены оценки влияния геометрических параметров на значение первой собственной частоты. В частности, рассмотрены варианты, в которых варьировались следующие параметры: толщина пьезопреобразователя; кривизна и толщина концентратора колебаний; длина стержневого звена. Другим важным параметром исследования явилась АЧХ продольных колебаний вблизи первой резонансной частоты. Отмечено, что малое изменение динамической вязкости акустической среды мало влияет на эту характеристику. А заметное увеличение этой вязкости приводит лишь к снижению амплитуды колебаний, но практически не изменяет частоту резонанса. Полученные результаты могут представлять интерес при конструировании ультразвуковых режущих медицинских приборов.

**Библиографический список**

1. Лощилов, В. И. К вопросу о механизме ультразвуковой резки биологических тканей / В. И. Лощилов, С. М. Волков // Труды МВТУ. — 1973. — № 165. — С. 29–33.

2. Акопян, В. Б. Ультразвук в медицине, ветеринарии и биологии / В. Б. Акопян, Ю. А. Ершов ; под ред. С. И. Щукина. — 2–е изд., испр. и доп. — Москва : Юрайт, 2017. — 223 с. — (Университеты России).

3. Дубровский, В. И. Биомеханика / В. И. Дубровский, В. Н. Федорова. — Москва : ВЛАДОС-пресс, 2003. — 672 с.

4. Carovac, A. Application of Ultrasound in Medicine / A. Carovac, F. Smajlovic, D. Junuzovic // Acta Informatica Medica. — 2011. — № 19 (3). — P. 168–171.
5. Dong, S. Review on piezoelectric, ultrasonic, and magnetoelectric actuators / S. Dong // Journal of Advanced Dielectrics. — 2012. — Vol. 2, № 1. — P. 1230001–1230019.
6. Liu, D.-K.-C. A brief review of actuation at the micro-scale using electrostatics, electromagnetics and piezoelectric ultrasonics / D.-K.-C. Liu, J. Friend, L. Yeo // Acoustical Science and Technology. — 2010. — № 31 (2). — P. 115–123.
7. Skaliukh, A. The general theory of polarization of ferroelectric materials / A. Skaliukh, G. Li // Advanced Materials. Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. — Cham : Springer, 2015. — Vol. 28. — P. 393–412.
8. Vykhodtseva, N. I. Pulse duration and peak intensity during focused ultrasound surgery: theoretical and experimental effects in rabbit brain in vivo / N. I. Vykhodtseva, K. Hynynen, C. Damianou // Ultrasound in medicine & biology. — 1994. — Vol. 20, is. 9. — P. 987–1000.
9. Duck, F.-A. Physical properties of tissue: a comprehensive reference book / F.-A. Duck. — London : Academic Press, 1990. — 336 p.
10. Белоконь, А. В. Новые схемы конечноэлементного динамического анализа пьезоэлектрических устройств / А. В. Белоконь, А. В. Наседкин, А. Н. Соловьев // Прикладная математика и механика. — 2002. — Т. 66, № 3. — С. 491–501.

**References**

1. Loshchilov, V.I., Volkov, S.M. K voprosu o mekhanizme ul'trazvukovoy rezki biologicheskikh tkaney. [Revisiting mechanism of ultrasonic cutting of bio-tissues.] Trudy MVTU im. Baumana, 1973, no. 165, pp. 29–33 (in English).
2. Akopyan, V.B., Yershov, Y.A. Ul'trazvuk v meditsine, veterinarii i biologii. [Ultrasound in medicine,veterinary science, and biology.] Shchukin, S.I., ed., 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Yurayt, 2017, 223 p. (in English).
3. Dubrovskiy, V.I., Fedorova, V.N. Biomekhanika. [Biomechanics.] Moscow: VLADOS-press, 2003, 672 p. (in English).
4. Carovac, A., Smajlovic, F., Junuzovic, D. Application of Ultrasound in Medicine. Acta Informatica Medica, 2011, no. 19 (3), pp. 168–171.
5. Dong, S. Review on piezoelectric, ultrasonic, and magnetoelectric actuators. Journal of Advanced Dielectrics, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 1230001–1230019.
6. Liu, D.-K.-C., Friend, J., Yeo, L. A brief review of actuation at the micro-scale using electrostatics, electromagnetics and piezoelectric ultrasonics. Acoustical Science and Technology, 2010, no. 31 (2), pp. 115–123.
7. Skaliukh, A., Li, G. The general theory of polarization of ferroelectric materials. Advanced Materials. Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Cham: Springer, 2015, vol. 28, pp. 393–412.
8. Vykhodtseva, N.I., Hynynen, K., Damianou, C. Pulse duration and peak intensity during focused ultrasound surgery: theoretical and experimental effects in rabbit brain in vivo. Ultrasound in medicine & biology, 1994, vol. 20, iss. 9, pp. 987–1000.
9. Duck, F.-A. Physical properties of tissue: a comprehensive reference book. London: Academic Press, 1990, 336 p.
10. Belokon, A.V., Nasedkin, A.V., Soloviev, A.N. Novye skhemy konechnoelementnogo dinamicheskogo analiza p'yezoelektricheskikh ustroystv. [New schemes of finite element dynamic analysis of piezoelectric devices.] Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2002, vol. 66, no. 3, pp. 491–501 (in English).

Поступила в редакцию 19.10.2017
Сдана в редакцию 19.10.2017
Запланирована в номер 30.10.2017

Received 19.10.2017
Submitted 19.10.2017
Scheduled in the issue 30.10.2017

***Об авторах:***

**Скалиух Александр Сергеевич,**
доцент кафедры «Математическое моделирование» Южного федерального университета (РФ, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а), кандидат физико-математических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000–0003–2934–4555
a.s.skaliukh@gmail.com

***Authors:***

**Skaliukh, Alexander S.,**
associate professor of the Mathematical Modeling Department, Southern Federal University (RF, 344090, Rostov-on-Don, ul. Milchakova, 8a), Cand.Sci. (Phys.-Math.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000–0003–2934–4555
a.s.skaliukh@gmail.com

**Герасименко Татьяна Евгеньевна,**
ассистент кафедры «Математическое моделирование» Южного федерального университета (РФ, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2797-8415
tegerasimenko@sfedu.ru

**Оганесян Павел Артурович,**
научный сотрудник кафедры «Математическое моделирование» Южного федерального университета (РФ, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а),
ORCID: http://orcid.org/0000–0003–2311–7562
paul.oganesyan@yandex.ru

**Соловьева Анна Аркадиевна,**
магистрант кафедры «Математическое моделирование» Южного федерального университета (РФ, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3816-8186
solovievarc@gmail.com

**Gerasimenko, Tatyana E.,**
teaching assistant of the Mathematical Modeling Department, Southern Federal University (RF, 344090, Rostov-on-Don, ul. Milchakova, 8a),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2797-8415
tegerasimenko@sfedu.ru

**Oganesyan, Pavel A.,**
research scholar of the Mathematical Modeling Department, Southern Federal University (RF, 344090, Rostov-on-Don, ul. Milchakova, 8a),
ORCID: http://orcid.org/0000–0003–2311–7562
paul.oganesyan@yandex.ru

**Solovieva, Anna A.,**
undergraduate of the Mathematical Modeling Department, Southern Federal University (RF, 344090, Rostov-on-Don, ul. Milchakova, 8a),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3816-8186
solovievarc@gmail.com